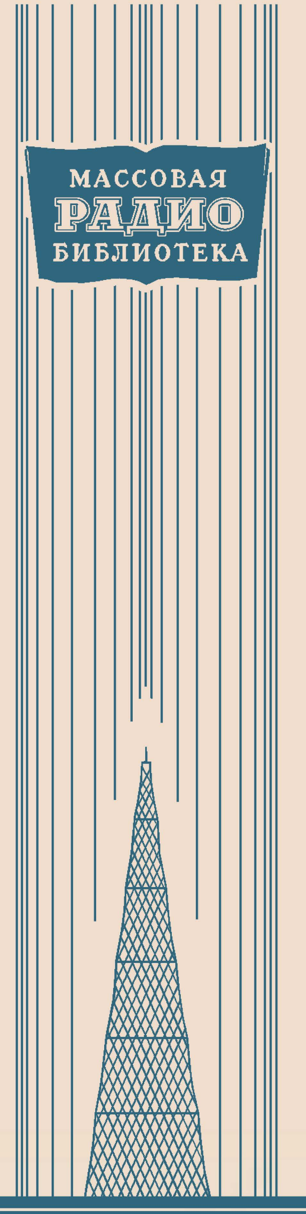



В. К. ЛАБУТИН

# ПРОСТЕЙШИЕ КОНСТРУКЦИИ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТРИОДАХ



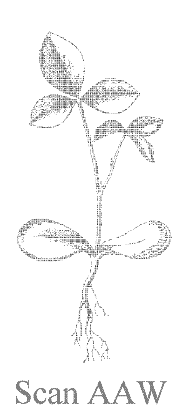
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

*Выпуск 297*

В. К. ЛАБУТИН

# ПРОСТЕЙШИЕ КОНСТРУКЦИИ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТРИОДАХ







ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1958 ЛЕНИНГРАД

На примерах описания простейших конструкций с полупроводниковыми триодами брошюра знакомит читателя с общими принципами действия и особенностями полупроводниковых триодов и с основами применения их в приемно-усилительной аппаратуре.

Брошюра рассчитана на широкий круг радиолюбителей.

## СОДЕРЖАНИЕ



---

*Лабутин Вадим Константинович*

ПРОСТЕЙШИЕ КОНСТРУКЦИИ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТРИОДАХ

Редактор *Ф. И. Тарасов* Техн. редактор *К. П. Воронин*

Сдано в набор 7/IV 1958 г. Подписано к печати 6/V 1958 г.
Т-04568 Бумага 84 × 108 1/32 2,46 печ. л. Уч.-изд. л. 2,7
Тираж 75 000 экз. Цена 1 р. 10 к. Заказ 1175

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

## НОВЫЙ СОПЕРНИК ЭЛЕКТРОННОЙ ЛАМПЫ

10 лет назад страницы журналов всего мира облетело сенсационное сообщение об изобретении новой «радиолампы», которая не требует вакуума и нити накала. Новый усилительный прибор отличался чрезвычайно малыми размерами, высокой экономичностью и обещал иметь во много раз больший срок службы, чем обычные радиолампы. Основной частью этого прибора была маленькая пластинка, вырезанная из кристалла полупроводникового материала.

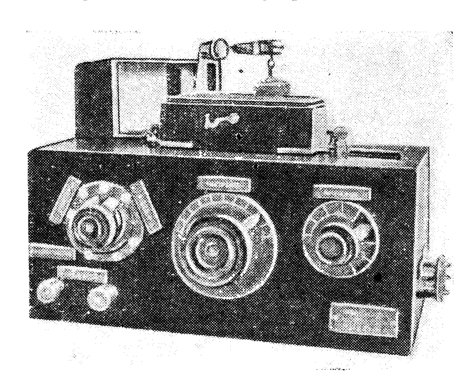


Рис. 1. Кристадин Лосева—первый радиоприемник, использовавший полупроводниковый усилитель (1922 г).

Так, в период бурного расцвета электронной техники, когда радиолампы успели уже пройти большой путь технического развития и стать весьма совершенными приборами, прочно вошедшими в современную технику, началась вторая молодость полупроводниковых усилителей.

Совсем в иных условиях проходила их первая жизнь.

... Начало 20-х годов. Предпринимаются первые попытки организовать радиовещание и дальнюю радиосвязь. Хотя радиолампа известна человечеству уже около 20 лет, слабое развитие электровакуумной техники и радиотехнической промышленности все еще заставляет широко пользоваться

искровыми передатчиками и искать другие приборы для генерирования, обнаружения и усиления радиосигналов. И вот сотрудник Нижегородской радиолаборатории О. В. Лосев совершает открытие, известие о котором лихорадочно перепечатывают все иностранные радиожурналы: генерировать и усиливать может не только сложная в изготовлении вакуумная радиолампа, но и простой кристаллический детектор. Приемники Лосева — «кристадины» — воспроизводятся в Европе и Америке, строятся прогнозы о скором вытеснении радиоламп кристаллами...

Однако недостаточность научных знаний об электрической природе кристаллов, слабое развитие лабораторной техники не позволили в то время глубоко исследовать процессы, происходящие в полупроводниках, и создать надежные высокоэффективные, не уступающие радиолампам полупроводниковые усилительные приборы. По мере дальнейшего совершенствования электронных ламп кристадин уступает место ламповым приемникам и уже к концу 20-х годов теряет практическое значение.

30-е годы явились триумфальным шествием электронной лампы. Улучшение усилительных свойств, создание многосеточных и мощных генераторных ламп, появление специальных ламп для работы на сверхвысоких частотах превратили радиолампу в универсальный прибор, способный решать широкий комплекс задач в самых различных областях техники и науки. Благодаря успехам электронной техники стали реальностью и «газета без бумаги и без расстояний» и массовое радиовещание, звуковое кино и телевидение, радиолокация и радиоастрономия, современные быстродействующие системы автоматики и телеуправления, радионавигация и электронные вычислительные машины, ультразвуковая техника и управление ядерными реакциями.

И чем более широкое применение находят электронные лампы, тем острее начинают проявляться некоторые принципиальные недостатки, свойственные им.

Еще в период второй мировой войны выявилась недостаточная надежность военной радиоаппаратуры, причем основная масса отказов была связана с неисправностью радиоламп. Вопросы срока службы и механической прочности радиоламп стали проблемами.

Широкое распространение радиовещательных приемников и телевизоров вскрывает другой серьезный недостаток современных радиоламп — их низкую экономичность. Достаточно указать, что в 1960 г. радиовещательные прием-

ники и телевизоры в Советском Союзе будут расходовать столько же электроэнергии, сколько будет вырабатывать ее крупнейшая в мире Куйбышевская ГЭС.

Развитие электронных вычислительных машин и других специальных устройств, включающих в себя тысячи радиоламп, выдвигает жесткие требования как к надежности и сроку службы ламп, так и к экономичности питания и минимальным размерам их.

Основные недостатки электронной лампы связаны с наличием в ней накаливаемого катода, потребляющего значительную энергию и имеющего малый срок службы, с необходимостью выдерживать точную геометрию большого числа электродов, которые часто представляют собой ювелирные изделия, и располагать их в вакууме, что неизбежно приводит к невысокой механической прочности и чрезвычайной сложности изготовления миниатюрных ламп. Сле-

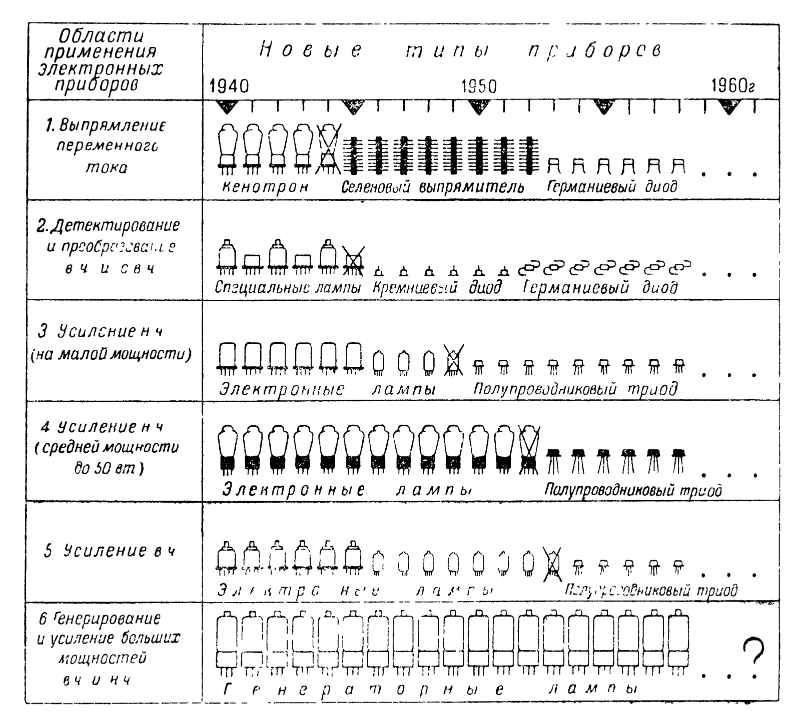



Рис. 2. Начиная с 40-х годов, радиолампы начинают вытесняться полупроводниковыми приборами. Сейчас осталась только одна область, в которой лампа еще не может быть заменена: генерирование и усиление больших мощностей.

дует также иметь в виду, что требование экономичности противоречит требованию большого срока службы, взаимно противоречивы и требования качества и механической прочности, с одной стороны, и миниатюрности—с другой. Поэтому дальнейшее улучшение радиоламп по всему комплексу предъявляемых современной техникой требований оказывается все более сложной задачей.

И уже в 40-х годах наблюдается стремление в ряде случаев переложить некоторые функции радиоламп на приборы других классов: кенотроны начинают заменяться селеновыми выпрямителями, вместо детекторных и смесительных ламп начинают применяться кремниевые и германиевые диоды с постоянной рабочей точкой. Конечно, эти приборы, так же как и магнитные и электромашинные усилители, способны решать лишь узкие специфические задачи и не могут серьезно конкурировать со всем классом электронно-вакуумных приборов. Основным универсальным усилительным и генераторным прибором остается радиолампа.

Но вот параллельно с прогрессом электронной техники, а в значительной мере и благодаря ему расширяются и углубляются представления человека о природе материи: развивается электронная теория металлов, обогащающая наши представления о физике металлических проводников и механизме их электропроводности; квантовая механика проливает новый свет на свойства электрона и его взаимодействие с другими частицами. Наконец, появляется зонная теория, которая позволяет объяснить свойства совершенно различных веществ — диэлектриков, проводников и полупроводников — с одной позиции: с точки зрения возможных энергетических состояний электрона. В ходе этого процесса науки удается не только объяснить многие непонятные прежде явления, но и вскрыть новые свойства материи, подчинить эти свойства воле человека. Этими достижениями и была подготовлена вторая жизнь полупроводниковых усилителей. Человек научился сознательно управлять движением электрона не только в вакууме, но и в толще кристалла, где электрон находится в непрерывном взаимодействии с другими частицами. В 1948 г. американцами Джоном Бардиным и Вальтером Браттейном был изготовлен первый трехэлектродный усилительный прибор, основанный на использовании особых свойств контактов с кристаллом полупроводника, — так называемый «точечный» полупроводниковый триод.

Открытие нового усилительного прибора, не требовавшего вакуума и нити накала, имевшего чрезвычайно малые

размеры, было теперь как нельзя кстати. И, несмотря на то, что по своим усилительным свойствам первый полупроводниковый триод с трудом шел в сравнение с современными радиолампами, за его усовершенствование сразу же взялся большой отряд специалистов.

Вильям Шокли в короткий срок разработал теорию полупроводниковых триодов и изобрел новый, более совершенный тип их — так называемый «плоскостной» полупроводниковый триод. Существенный вклад в теорию и технику полупроводников внесли и советские специалисты: акад. А. Ф. Иоффе, Б. И. Давыдов, акад. И. Е. Тамм.

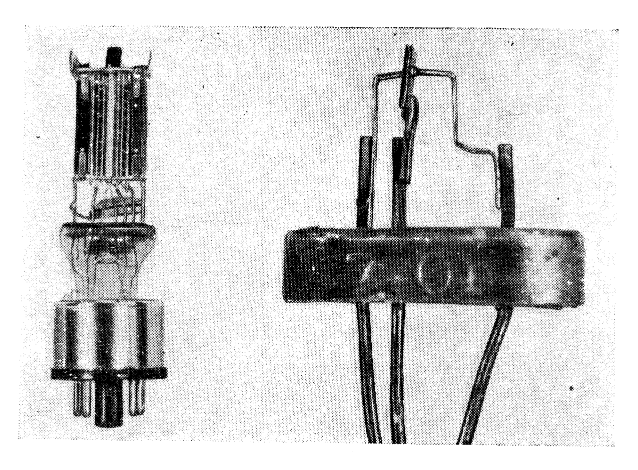


Рис. 3. Достаточно вскрыть колбу электронной лампы и полупроводникового триода, чтобы обнаружить исключительную простоту конструкции последнего (лампа уменьшена, полупроводниковый триод увеличен).

Первым полупроводниковым триодам были свойственны серьезные недостатки: высокий уровень шумов. ограниченный диапазон рабочих частот, сильная зависимость электрических параметров от температуры, ограниченная мощность. Многие из них являются детскими болезнями молодой техники и успешно преодолеваются по мере накопления опыта и дальнейшего развития теории. Становится все яснее, что в лице полупроводникового триода старая электронная лампа встречает серьезного конкурента.

За короткий срок предельные рабочие частоты полупроводниковых триодов выросли от нескольких сотен килогерц до тысяч мегагерц. Наряду с маломощными приборами

уже созданы полупроводниковые триоды, обеспечивающие выходную мощность в несколько десятков ватт. Появились полупроводники, способные работать при температуре до 500° С. Резко снижен уровень собственных шумов полупроводниковых триодов. Сейчас самые низкошумящие усилители часто удается создавать именно на полупроводниковых триодах, а не на лампах. Что же касается миниатюрности, механической прочности и экономичности, то в этих вопросах пальма первенства безраздельно принадлежит полупроводниковым триодам с момента их изобретения.

В ряде применений лампа уже не способна конкурировать с полупроводниковым триодом. Это прежде всего слуховые аппараты, размеры и вес которых при переходе к полупроводниковым триодам уменьшились в 3—5 раз, а потребление энергии сократилось в 20—50 раз. Затем — это карманные («портсигарные») приемники, проблему которых с помощью радиоламп удовлетворительно решить не удалось вообще. Успешно продвигается внедрение полупроводниковых триодов в вычислительные машины, в аппаратуру, предназначенную для длительной работы без контроля человека (например, промежуточные усилители в системах дальней связи), где требуется высокая надежность, экономичность и большой срок службы.

В настоящее время промышленностью выпускаются полупроводниковые триоды, предназначенные для решения следующих задач.

**Универсальные маломощные триоды.** Типичными представителями этой группы являются плоскостные германиевые триоды типов П1 и П6 отечественного производства. Это высокоэкономичные усилительные приборы малых размеров, позволяющие успешно усиливать и генерировать сигналы низких и умеренно высоких частот (до 500—1 000 *кгц*). Один каскад усиления с таким триодом способен обеспечить усиление мощности сигнала до 30 000 раз. Максимальная выходная мощность в однотактной схеме достигает 10—30 *мвт*. Для нормальной работы этих триодов требуется питание током до 1 *ма* при напряжении в несколько вольт, но усилительные свойства проявляются и при существенно меньших мощностях питания, совершенно немыслимых для обычных радиоламп, например при токе 10 *мка* и напряжении 0,2 *в*.

**Мощные низкочастотные приборы.** Эта группа включает в себя плоскостные триоды, предназначенные специально для оконечных и мощных предоконечных каскадов низко-

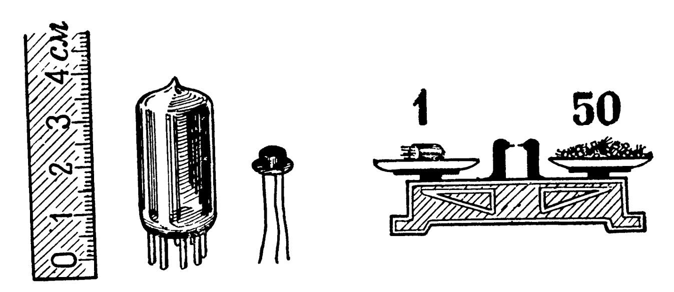



Рис. 4. Важнейшим преимуществом полупроводникового триода являются его малые размеры и вес.

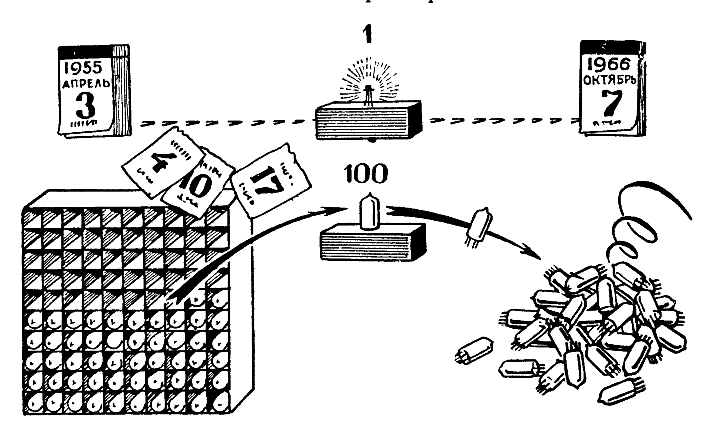



Рис. 5. Срок службы полупроводниковых триодов может достигать десятков тысяч часов.

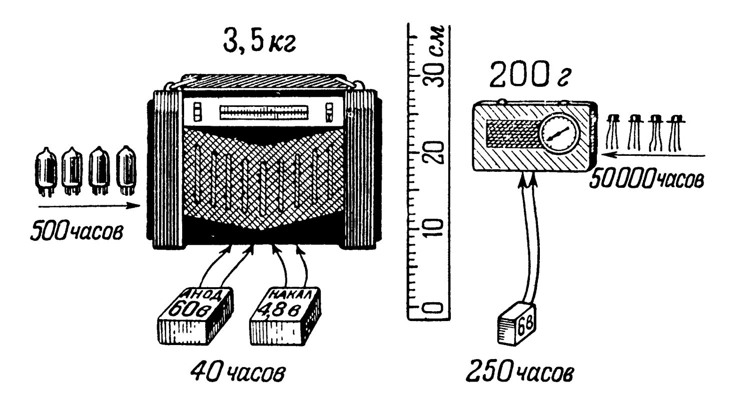



Рис. 6. Наибольший эффект дает применение полупроводниковых триодов в портативной переносной радиоаппаратуре.

частотных усилителей. Они также успешно применяются в преобразователях постоянного тока, повышающих напряжение от единиц и десятков до сотен и даже тысяч вольт, усилителях постоянного тока, работающих на исполнительные механизмы (реле, двигатели), генераторах низкой частоты (до нескольких десятков килогерц) и импульсных схемах при умеренных частотах. К этой группе приборов

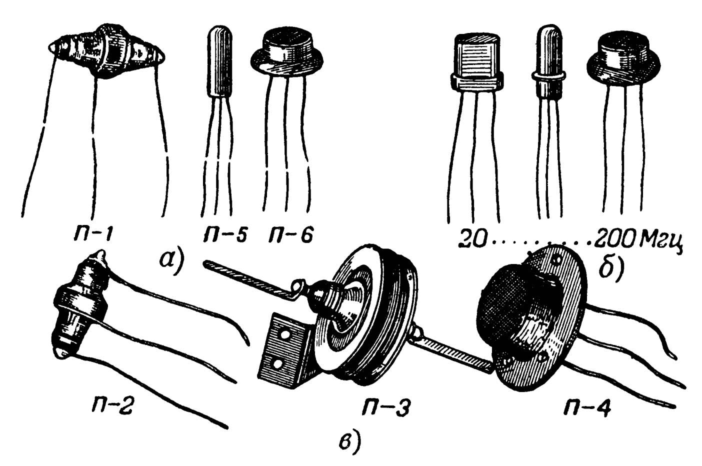



Рис. 7. Внешний вид полупроводниковых триодов.
*а* — для усиления слабых сигналов низкой частоты; *б* — то же высокочастотных; *в* — то же мощных.

относятся триоды типов П2, П3 и П4, обеспечивающие отдачу полезной мощности от 0,5—1 (П2) до 30 *вт* (П4) в двухтактной схеме в режиме класса В.

**Высокочастотные маломощные приборы.** В течение ряда лет считали, что наиболее высокочастотными триодами могут быть точечные. Поэтому, несмотря на появление более совершенных и надежных плоскостных триодов, продолжали совершенствовать и выпускать точечные триоды. В отечественном ассортименте имеется четыре группы точечных триодов (С1, С2, С3 и С4), предельные частоты усиления которых достигают 10 *Мгц*.

Но, как показали достижения последних лет, наиболее высокочастотными приборами являются особые разновидности плоскостных триодов и тетродов (так называемые «поверхностно-барьерные», триоды с двухслойной базой, «диффузионные» и др.). Эти приборы сейчас выходят из стен лабораторий и начинается их массовое производство. Они пригодны для усиления сигналов с частотой от единиц

до сотен мегагерц. Эти триоды оказываются также прекрасными приборами для быстродействующих импульсных схем и широкополосных усилителей.

Плоскостные высокочастотные триоды и тетроды способны в режиме класса С развивать максимальную мощность до десятых долей ватта.

Таким образом, на сегодня мы имеем широкий ассортимент полупроводниковых приборов, способных решать большой круг задач, в котором еще недавно безраздельно господствовала электронная лампа. До сих пор, к сожалению, не удалось создать мощных высокочастотных полупроводниковых приборов, способных заменить мощные генераторные лампы. Однако уже начинают появляться сообщения о первых достижениях и в этом направлении.

Как бы ни решился этот вопрос, уже сегодня класс полупроводниковых приборов представляет собой мощное средство дальнейшего совершенствования современной радиоэлектронной аппаратуры, и выражением глубокой признательности человечества создателям современных полупроводниковых усилительных приборов явилось присуждение В. Шокли, Д. Бардину и В. Браттейну Нобелевской премии 1956 г.

## КАК УСИЛИВАЕТ КРИСТАЛЛ

Наблюдается некоторое подобие общей схемы действия полупроводникового триода и обычного вакуумного триода.

В полупроводниковом триоде можно найти электрод, аналогичный катоду радиолампы, функцией которого является испускание элементарных заряженных частиц, — так называемый эмиттер. Далее имеется пространство, в котором эти частицы распространяются, называемое базой. И, наконец, есть электрод, подобный аноду, собирающий на себе основную массу испущенных эмиттером зарядов, — коллектор.

Управлять током коллектора можно путем сообщения базе того или иного потенциала относительно эмиттера. Таким образом, база может быть уподоблена управляющей сетке.

Однако эта аналогия дает весьма поверхностное приближение к процессам, происходящим в полупроводниковом триоде. В действительности они значительно сложнее и существенно отличаются от принципов, с которыми мы встречаемся в вакуумных электронных лампах. Коренное отличие состоит в том, что все процессы в полупроводниковом триоде

происходят не в вакууме, а в объеме кристаллической решетки особым образом приготовленного полупроводника, большей частью германия.

Несмотря на то, что химики относят элемент германий к металлам, его электрические свойства резко отличаются от свойств хорошо знакомых нам металлов-проводников и механизм электропроводности германия совершенно иной. В отличие от проводниковых металлов, у которых колоссальное количество электронов не связано с определенными атомами и может свободно переносить электрические заряды через объем проводника, образуя при приложении внешнего напряжения электрический ток, в кристаллах германия подавляющая масса электронов довольно жестко связана с определенными атомами, причем именно эти закономерные связи атомов посредством электронов и обусловливают кристаллическую структуру германия. Поэтому электрическое сопротивление чистого германия обычно превышает сопротивление проводниковых металлов в тысячи раз.

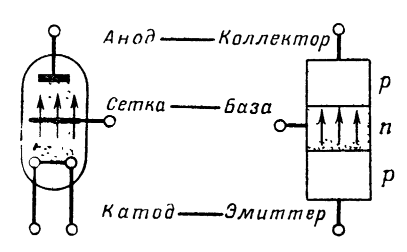


Рис. 8. Можно обнаружить некоторое сходство в принципах действия полупроводникового триода и электронной лампы.

Однако при повышении температуры, освещении кристалла и некоторых других воздействиях наблюдается резкое снижение сопротивления германия. Современная физика объясняет это тем обстоятельством, что связи некоторой части электронов с атомами германия недостаточно прочны и при определенных внешних воздействиях легко нарушаются, причем высвобождаются сразу носители электрических зарядов двух видов: электроны (носители отрицательного электричества) и так называемые «дырки» (носители положительного электричества).

Дыркой образно назвали то место, в котором находился высвобожденный из связи электрон. По сути дела дырка представляет собой не какую-то особую частицу, а просто излишек положительного электричества, появляющийся в районе атомов, связь между которыми нарушена из-за ухода электрона. При этом оказывается, что дырка может передвигаться подобно высвобожденным из связей электронам.

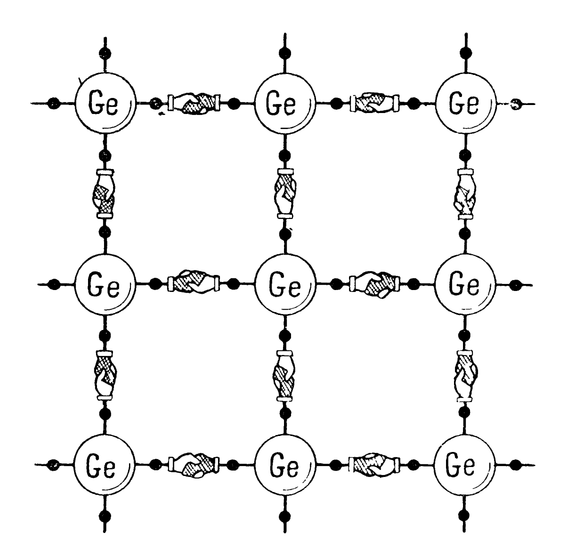



Рис. 9. Прочность кристаллической решетки германия объясняется тем, что каждый атом германия посредством своих четырех внешних электронов вступает в связи с четырьмя атомами-соседями; однако свободных электронов не остается и кристалл не проводит электрического тока.

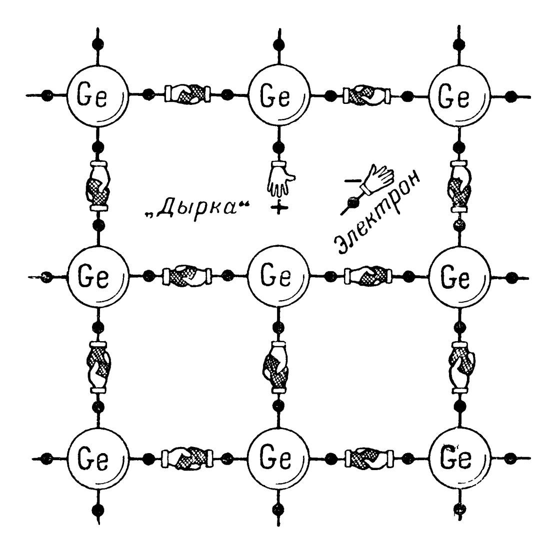



Рис. 10. При вырывании электрона из связи одновременно появляются два носителя электричества: электрон (—) и „дырка“ (+).

Подвижность дырки объясняют не перемещением атомов с некомпенсированным положительным зарядом — они очень прочно удерживаются в соответствующих узлах кристаллической решетки, а способностью перескакивать на место нарушенной связи одного из электронов, участвующих в связях соседних атомов, причем первоначальная дырка пропадает, а появляется дырка рядом и т. д., как бы по эстафете.

Прохождение электрического тока через кристалл германия объясняется вступлением свободных электронов и дырок в направленное движение под влиянием внешнего напряжения. Электроны движутся при этом, как и в проводниках, от минуса к плюсу, а дырки, являясь носителями положительного заряда, — навстречу: от плюса к минусу. Полный ток равен сумме электронного и дырочного токов.

Описанный механизм проводимости свойственен не только германию, но и всему классу полупроводниковых материалов, в том числе и получающему в настоящее время все большее распространение кремнию.

Отличительными особенностями поведения носителей электричества в полупроводниках является способность к диффузии и рекомбинации.

Высвобожденные тем или иным способом электроны и дырки хаотично перемещаются по объему кристалла. Однако наряду с беспорядочным движением их всегда наблюдается и направленное перемещение носителей в те области кристалла, где их количество (точнее, концентрация) меньше, что приводит к выравниванию концентрации носителей заряда по обьему кристалла. Такое самопроизвольное выравнивание концентрации носителей по своей природе аналогично распространению тепла в металлических предметах от нагретого участка к холодному и называется диффузией.

Суть рекомбинации состоит в том, что носители противоположных знаков, путешествуя по объему кристалла, могут при встрече пропадать: свободный электрон, попадая в дырку, восстанавливает утраченную здесь когда-то связь и лишается дальнейшей свободы перемещения. Одновременно, разумеется, пропадает и дырка. В связи с этим говорят об ограниченном «времени жизни» носителей электричества в полупроводниках.

Сильно увеличить электропроводность полупроводников удается путем введения самых ничтожных количеств некоторых посторонних примесей. Выбирая соответствующую примесь, можно получить кристаллы германия с ярко выраженной электронной проводимостью и подавленной дырочной

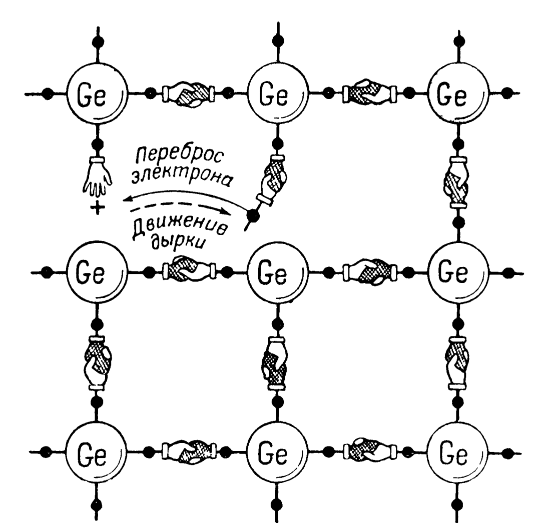



Рис. 11. Подвижность дырки объясняется возможностью связанных электронов „перескакивать" из одной связи в другую, причем дырка перемещается навстречу перескочившему электрону.

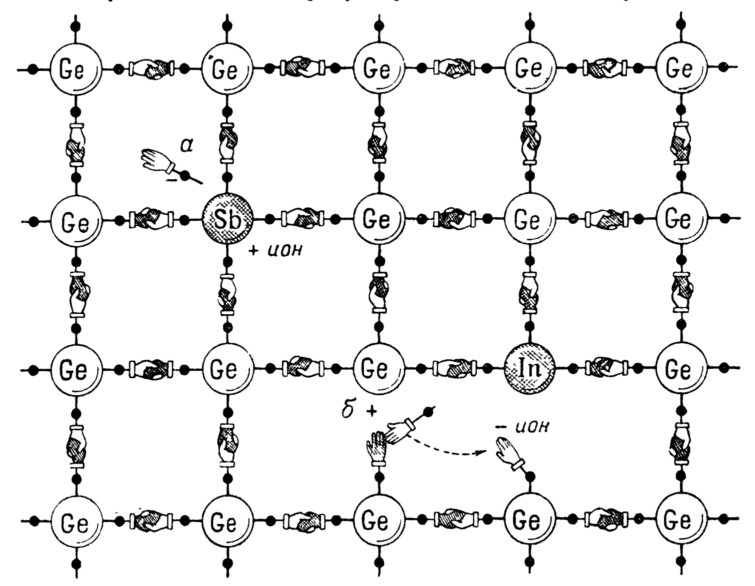



Рис. 12. Замещая отдельные атомы германия атомами других веществ, например сурьмы (Sb), имеющими пять валентных электронов, или индия (In), имеющими три валентных электрона, можно получать в кристалле дополнительные свободные электроны (*а*) или дырки (*б*).

(так называемый германий *n*-типа) или, наоборот, с преобладающей дырочной проводимостью (германий *p*-типа). Дело в том, что атомы примеси могут, не нарушая структуры кристаллической решетки германия, внедряться в ее узлы вместо отдельных атомов германия. При этом, если число внешних электронов у примесных атомов не равно числу их у атомов германия, то либо остаются лишние электроны, либо образуются дополнительные дырки, чем объясняется как увеличение проводимости, так и преобладание того или иного типа проводимости.

Типичный современный полупроводниковый триод (плоскостной) представляет собой монокристаллическую пластинку, в которой благодаря введению особых примесей образованы три области с чередующимися типами проводимости: *p-n-p* или *n-p-n*.

Дальнейший рассказ мы поведем применительно к триодам наиболее распространенного типа *p-n-p*, хотя принципы работы триодов типа *n-p-n* совершенно аналогичны, с той лишь разницей, что электроны и дырки обмениваются функциями.

Основную роль в процессах, происходящих в полупроводниковых триодах, играют так называемые электронно-дырочные переходы (*p-n*-переходы) — границы раздела областей с противоположными типами проводимости. В полупроводниковом триоде таких переходов два.

Если включить один *p-n*-переход в цепь переменного тока (рис. 13), то нетрудно обнаружить, что ему присущи свойства выпрямителя: для тока одного направления он представляет очень малое сопротивление (единицы ом), а для тока обратного направления — очень большое (сотни килоом).

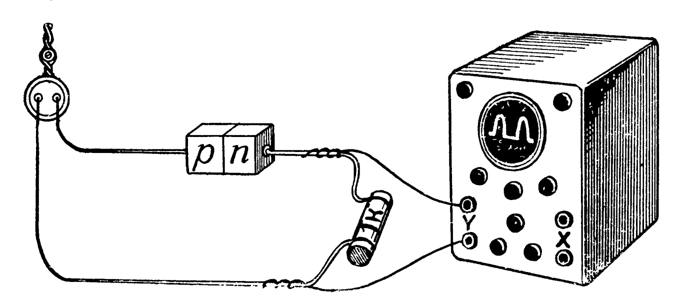


Рис. 13. При включении *p-n*-перехода в цепь переменного тока обнаруживаются присущие ему свойства выпрямителя.

Объясняется это следующим образом.

В связи с тем, что концентрации свободных электронов и дырок в $n$- и $p$-областях различны, при возникновении $p$-$n$-перехода сразу же начинается диффузия носителей электричества через переход: дырки из области $p$-типа, где их концентрация велика, переходят в $n$-область, где их мало, а электроны, наоборот, из $n$-области в $p$-область. Это приводит к тому, что $n$-область приобретает положительный

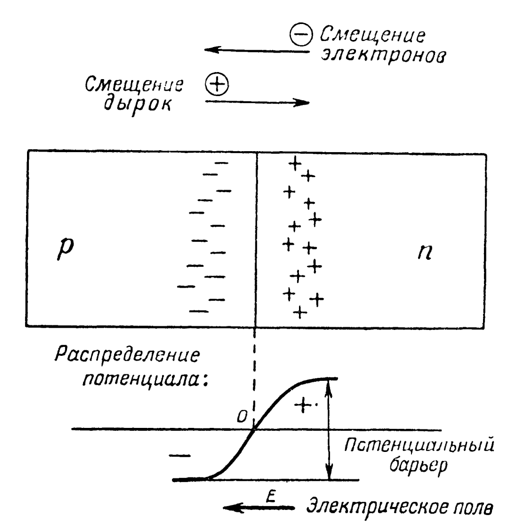



Рис. 14. В результате диффузионного смещения носителей через $p$-$n$-переход при его образовании на границе раздела возникает потенциальный барьер.

заряд, а $p$-область заряжается отрицательно (рис. 14). На границе же раздела областей появляется электрическое поле этих зарядов, причем это поле $E$ (рис. 14) противодействует дальнейшему переходу носителей через границу.

В результате на границе раздела $n$- и $p$-областей возникает устойчивый потенциальный барьер, характеризующийся динамическим равновесием сил диффузии носителей и встречного поля.

Если теперь приложить к $p$-$n$-переходу внешнее напряжение так, что к положительно заряженной $n$-области будет присоединен плюс, а к отрицательно заряженной $p$-области — минус (рис. 15,*а*), то исходный потенциальный барьер будет еще более повышен и через $p$-$n$-переход удастся прорваться лишь ничтожному количеству носителей тока. Сле-

довательно, электрическое сопротивление *p-n*-перехода будет велико, а ток через него — очень мал (у хороших переходов меньше 1 *мка*) во всем интервале рабочих напряжений. Такое включение *p-n*-перехода называют обратным.

Если же к *n*-области приложить минус, а к *p*-области — плюс внешнего источника напряжения (рис. 15,*б*), то дырки, внедряющиеся из *p*-области в *n*-область, легко будут компенсироваться электронами, поступающими из внешней цепи от присоединенного к *n*-области отрицательного полю-

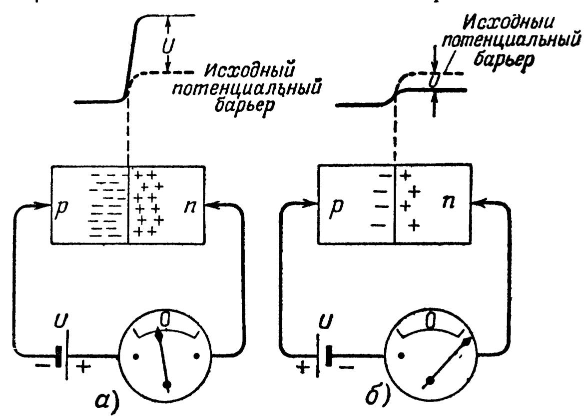



Рис. 15. Поведение *p-n*-перехода при приложении обратного (*а*) и прямого (*б*) напряжения.

са источника, а электроны, переходящие из *n*-области в *p*-область, будут уходить к присоединенному к *p*-области положительному полюсу источника. Потенциальный барьер упадет, условия перехода носителей через него облегчатся, и все новые и новые количества дырок будут поступать из *p*-области в *n*-область, а электронов — из *n*-области в *p*-область.

При таком включении перехода, называемом прямым, ток через переход может достигать колоссальных значений, губительных для пластинки германия, если в цепь не введено ограничивающее ток сопротивление.

Варьируя количество примесей, введенных в *p*- и *n*-области, можно добиться преобладания в прямом токе либо дырочной, либо электронной составляющей.

В принципе конструкция полупроводникового триода симметрична: посредине — область с одним типом проводимости, по краям ее — области с другим типом проводимости. Однако для того, чтобы такой триод начал

проявлять усилительные свойства, его надо превратить в несимметричный прибор путем подачи питания на один переход в прямом направлении, а на другой — в обратном (рис. 16).

Переход, включаемый в прямом направлении, называют эмиттерным, а в обратном — коллекторным. В соответствии с этим присваивают различные названия (эмиттер и коллектор) крайним областям, обладающим одинаковым типом проводимости. Если бы не было эмиттерного перехода вбли-

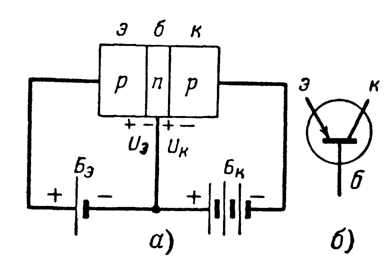



Рис. 16. Схема подачи питания на электроды триода типа *р-п-р* (*а*) и условное обозначение такого триода (*б*).

*э* — эмиттер; *б* — база; *к* — коллектор.

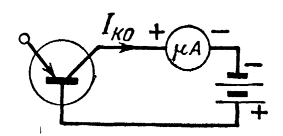



Рис. 17. Обратный ток коллектора $I_{к.о}$, измеряемый при отключенном эмиттере, является важной характеристикой полупроводникового триода.

зи коллекторного, то ток в цепи коллектора был бы ничтожно малым, так как коллекторный переход включен в обратном направлении. Такое явление наблюдается при отключении эмиттера от источника питания его (рис. 17). Ток, проходящий при этом через коллектор, называют обратным током коллектора (обозначают $I_{к.о}$) и считают важным параметром полупроводникового триода, характеризующим качество, температурную стабильность и ряд других свойств прибора. Чем меньше значение $I_{к.о}$, тем доброкачественнее полупроводниковый триод.

При пропускании прямого тока через эмиттерный переход нетрудно заметить, что ток коллектора существенно возрастает и приобретает значение, близкое к току эмиттера. Это явление можно понять, рассмотрев механизм прохождения тока в триоде, поясняемый рис. 18.

При изготовлении полупроводникового триода область эмиттера насыщают примесью, создающей дырочную проводимость в значительно большей мере, чем область базы примесью, дающей электронную проводимость.

В результате концентрация дырок в эмиттере оказывается значительно больше не только концентрации дырок

в области базы, но даже концентрации электронов в базе. Поэтому прямой ток, проходящий через эмиттерный переход, в основном состоит из дырок, поступающих из эмиттера в базу (*а* на рис. 18), и лишь в ничтожной части из электронов, переходящих из базы в эмиттер (*б* на рис. 18). Происходит так называемая инъекция (впрыскивание) дырок эмиттером в базу, аналогичная эмиссии электронов из катода вакуумной электронной лампы. Впрыснутые в базу дыр-

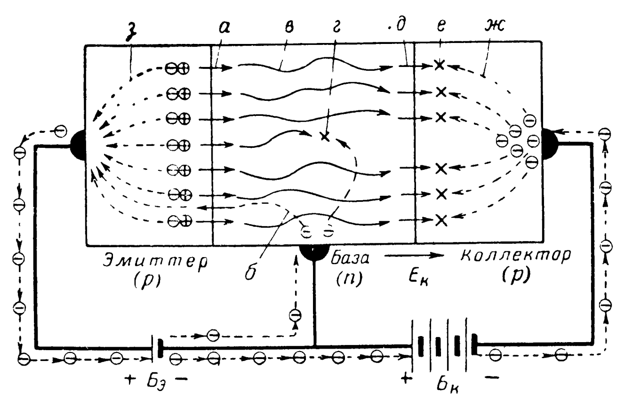



Рис. 18. Схема распределения тока эмиттера в плоскостном полупроводниковом триоде типа *р-п-р*.

*а* — инъекция дырок; *б* — электронная составляющая эмиттерного тока; *в* — диффузия дырок в базе; *г* — рекомбинация в базе; *д* — „дрейф" дырок через коллекторный переход под действием поля $E_K$; *е* — рекомбинация в коллекторе; *ж* — приток электронов к коллекторному переходу из внешней цепи; *з* — уход электронов из эмиттера во внешнюю цепь.

ки имеют ограниченное «время жизни», в течение которого они должны рекомбинировать с электронами.

Однако благодаря диффузии впрыснутые дырки начинают перемещаться в область базы, прилегающую к коллектору, где их концентрация меньше (*в* на рис. 18).

Толщина базы в полупроводниковом триоде очень мала (десятки и даже единицы микрон). Поэтому, несмотря на относительно малую скорость диффузионного перемещения, по пути к коллектору успевает рекомбинировать (*г* на рис. 18) весьма малая доля общего количества дырок, впрыснутых эмиттером. Попадая же в область коллекторного перехода, к которому приложено значительное обратное напряжение, дырки подвергаются действию сильного ускоряющего поля, втягиваются им и моментально захватываются коллектором (*д* на рис. 18), где и «оканчивают жизнь» за счет рекомбинации (*е* на рис. 18) с электронами,

поступающими (*ж* на рис. 18) из источника питания коллекторной цепи $Б_к$.

Несмотря на непрерывную инъекцию дырок эмиттером, запасы их в эмиттере не убавляются, так как одновременно с переходом дырок из эмиттера в базу эмиттер покидает соответствующее количество электронов (*з* на рис. 18), уходящих во внешнюю цепь к положительному зажиму источника $Б_э$, в результате чего в эмиттере появляются новые дырки.

Таким образом, под действием батареи $Б_э$ в эмиттере непрерывно генерируются пары «электрон — дырка», причем электроны выходят во внешнюю цепь, а дырки благодаря инъекции через эмиттерный переход, диффузии через базу и захвату коллектором в основном добираются до коллектора, где рекомбинируют и вызывают этим приток соответствующего числа электронов из источника $Б_к$. За вычетом небольшого тока базы, связанного с электронной составляющей тока через эмиттерный переход и частичной рекомбинацией дырок в области базы, ток, введенный в эмиттер, передается в цепь коллектора.

Изменяя ток эмиттера, можно тем самым менять и ток коллектора. Поскольку эмиттерный переход работает в прямом направлении, напряжение, прикладываемое к зажимам эмиттер — база, мало (порядка 0,1—0,2 *в*). Коллекторный переход работающий в обратном направлении, напротив, допускает питание достаточно высоким напряжением (до нескольких десятков вольт).

Из этих соображений уже очевидна возможность усиления с помощью полупроводникового триода, ибо ток, вводимый в цепь эмиттера при малом напряжении, может быть передан в цепь коллектора со значительно бо́льшим напряжением.

Простейший усилитель с полупроводниковым триодом изображен на рис. 19.

Исходная рабочая точка полупроводникового триода однозначно определяется током эмиттера и напряжением на коллекторе. Выбор рабочей точки обеспечивается соответствующим выбором источников питания $Б_э$ и $Б_к$ и ограничивающего ток эмиттера сопротивления $R_э$. В цепь эмиттера, кроме того, вводится усиливаемый сигнал (в схеме на рис. 19 — при помощи трансформатора *Тр*). В цепь коллектора включается полезное нагрузочное сопротивление $R_н$. Входное сопротивление триода $R_{вх}$ мало, так

как эмиттерный переход включен в прямом направлении. Сопротивление же нагрузки $R_н$ можно взять достаточно большим при надлежащем выборе напряжения батареи $Б_к$. Тогда мощность сигнала в нагрузочном сопротивлении будет больше мощности, подводимой к триоду, т. е. будет

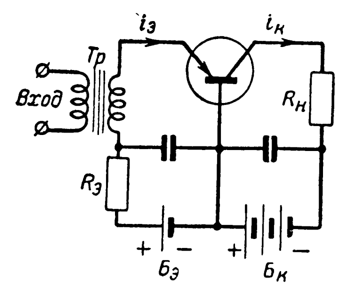



Рис. 19. Принципиальная схема усилителя с общей базой.

Рис. 20. Основная схема усилителя на полупроводниковом триоде с общим эмиттером (для упрощения цепи питания не показаны).

иметь место усиление. Коэффициент усиления по мощности можно оценить следующим образом:

$$K_P = \frac{P_н}{P_{вх}} = \frac{i_к^2 R_н}{i_э^2 R_{вх}} \approx \frac{R_н}{R_{вх}},$$

так как $i_к \approx i_э$ (здесь через $i_к$ и $i_э$ обозначены действующие значения переменных составляющих токов коллектора и эмиттера).

Рассматриваемая схема включения триода называется схемой с общей базой, так как вывод базы является общим для входной и выходной цепей триода.

Для этой схемы характерно отсутствие усиления по току ($i_к \approx i_э$). Усиление по напряжению и мощности, как это следует из приведенной выше формулы, возможно лишь при условии, что полезное сопротивление нагрузки выбрано больше входного сопротивления триода.

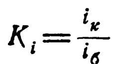
Значительно большее усиление может быть получено при включении триода по схеме с общим эмиттером, которую вообще считают основной схемой включения полупроводникового триода (рис. 20).

В этой схеме сигнал по-прежнему подводится к эмиттерному переходу, включенному в прямом направлении. Однако нагрузочное сопротивление присоединено своим нижним концом уже не к базе, а к эмиттеру. При этом источнику

усиливаемого сигнала приходится создавать не весь ток эмиттера, а только ту небольшую его часть, которая теряется по пути от эмиттера к коллектору, равную току базы:

$$i_б = i_э - i_к,$$

Поэтому при таком включении входное сопротивление полупроводникового триода оказывается в десятки раз выше, чем у схемы с общей базой, появляется заметное усиление по току



$$K_i = \frac{i_к}{i_б}$$

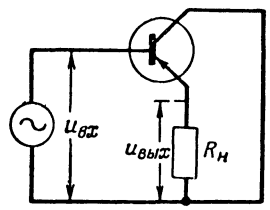



Рис. 21. Усилитель по схеме с общим коллектором (для упрощения цепи питания не показаны).

и сохраняется практически прежнее усиление по напряжению.

Иногда применяется третья схема включения полупроводникового триода — с общим коллектором. Эта схема (рис. 21) похожа по своим свойствам на схему катодного повторителя с электронной лампой: усиление по напряжению отсутствует ($u_{вых} \approx u_{вх}$), входное сопротивление особенно велико (до единиц мегом), выходное сопротивление очень мало (десятки ом). Однако эта схема дает небольшое усиление по мощности и применяется только в особых случаях.

Для большей наглядности сравнительные характеристики трех схем включения плоскостных полупроводниковых триодов приведены в таблице на стр. 24.

В отличие от ламповых схем усиление устройств с полупроводниковыми триодами, как правило, оценивают с помощью коэффициента усиления по мощности.

Как известно, лампа в наиболее распространенной схеме включения (с общим катодом) требует шунтирования входной цепи (сетка — катод) сопротивлением, существенно меньшим (0,2—1 *Мом*), чем входное сопротивление собственно лампы (десятки мегом). Обычно еще меньшие значения сопротивлений (десятки и сотни килоом) приходится выбирать для нагрузочных сопротивлений. При этом для возбуждения собственно лампы очередного каскада тратится ничтожно малая доля всей мощности, создаваемой предыдущим каскадом и в основном рассеиваемой в схем-

| Характеристика схемы | Схема включения триода | | |
|---|---|---|---|
| | с общей базой | с общим эмиттером | с общим коллектором |
| Входное сопротивление | Малое (30—100 *ом*) | Среднее (400 — 2 000 *ом*) | Большое (5 — 200 *ком*) |
| Выходное сопротивление | Большое (0,2—1 *Мом*) | Среднее (25 — 100 *ком*) | Малое (30—10 000 *ом*) |
| Усиление по току | Отсутствует (около 1) | Одинаковое (10 — 100) | |
| Усиление по напряжению | Одинаковое (1 000 — 5 000) | | Отсутствует (около 1) |
| Усиление по мощности при согласовании | Среднее (30 *дб*) | Большое (40 *дб*) | Малое (15 *дб*) |
| Усиление по мощности в многокаскадных усилителях на сопротивлениях | Отсутствует | Большое (25 *дб* на каскад) | Малое (до 30 *дб* на весь усилитель) |

Средние числовые значения, указанные в таблице, соответствуют усилителям, работающим при малом уровне выходной мощности (не более единиц милливатт) в типичной рабочей точке (1 *ма* при 5 — 10 *в*).

ных сопротивлениях. Поэтому вопрос об усилении по мощности в ламповых схемах обычно отступает на задний план.

У полупроводниковых же триодов из-за присущего им относительно низкого входного сопротивления довольно легко избежать существенных потерь мощности усиливаемого сигнала в схемных элементах и передавать на возбуждение следующего триода основную часть всей мощности, развиваемой предыдущим триодом. Поэтому более наглядным и правильным оказывается рассмотрение коэффициента усиления по мощности, тем более что задачей всякого усилителя в конечном счете является именно усиление мощности сигнала.

## ЭКОНОМИЧНЫЕ УСИЛИТЕЛИ ДЛЯ ДЕТЕКТОРНЫХ ПРИЕМНИКОВ

Усилители-приставки на полупроводниковых триодах оказываются несравненно более экономичными, чем ламповые усилители. Для питания их достаточно одной-двух батареек от карманного фонаря. Размеры деталей полупроводниковых усилителей настолько незначительны, что весь усилитель часто удается смонтировать в корпусе самого детекторного приемника.

**Простейший усилитель с одним полупроводниковым**

**триодом** (рис. 22) позволяет существенно повысить громкость радиоприема, прослушивать радиопередачи одновременно на несколько головных телефонов (их включают для этого последовательно).

Кроме полупроводникового триода ПТ, в качестве которого может работать любой маломощный плоскостной триод типа П1 или П6, в схеме имеются лишь три детали: конденсатор *С*, отделяющий схему детекторного приемника от цепей питания усилителя, сопротивление $R_1$, создающее цепь постоянного тока для детектора, и сопротивление $R_2$, служащее для установки необходимого тока коллектора полупроводникового триода. Источником питания может служит любая батарея, дающая напряжение 1,5—10 *в*, например батарейка от карманного фонаря или даже один элемент.

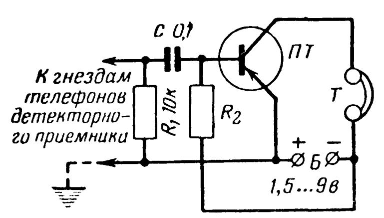



Рис. 22. Принципиальная схема простейшего усилителя с одним полупроводниковым триодом.

Для хорошей отдачи полезной мощности полупроводниковый триод подобно выходным лампам требует определенного согласования с сопротивлением нагрузки. В качестве телефонов желательно применять высокоомные (2 000 *ом*).

Особо следует остановиться на роли сопротивления $R_2$. Как мы видели выше, для нормальной работы полупроводникового триода нужно, чтобы к каждому *р-п*-переходу было приложено напряжение: к коллекторному переходу — «обратное», а к эмиттерному — «прямое». В схеме на рис. 16 для этой цели были применены две индивидуальные батареи. Однако из той же схемы видно, что напряжения на эмиттерном и коллекторном переходах имеют такую полярность, что в принципе их можно создать с помощью одной батареи, включенной между эмиттером и коллектором. При этом уже за счет одного обратного тока коллектора на эмиттерном переходе может возникнуть необходимое для нормальной инъекции дырок падение напряжения. В этом случае усилитель будет работать даже в отсутствие сопротивления $R_2$.

Но в большинстве случаев, особенно у хороших триодов с малым обратным током коллектора $I_{к.о}$, произвольное падение напряжения на эмиттерном переходе получается малым, недостаточным для нормальной инъекции дырок.

Тогда, вводя сопротивление $R_2$, можно увеличить ток через эмиттерный переход и вызвать дополнительное смещение его в прямом направлении. Это приведет к усилению инъекции дырок и соответственно к увеличению тока коллектора.

Изменяя величину сопротивления $R_2$ (в пределах 50 *ком* — 2 *Мом*), можно в широких пределах изменять ток коллектора и, варьируя таким образом рабочую точку триода, добиться наиболее эффективной работы усилителя.

Важнейшим усилительным параметром полупроводникового триода является коэффициент усиления по току, показывающий, во сколько раз амплитуда тока усиливаемого сигнала в выходной цепи больше амплитуды тока сигнала во входной. Статический коэффициент усиления по току (при отсутствии сопротивлений в выходной цепи) для схемы с общей базой обозначают символом $\alpha$ (альфа) или $h_{21}$, а для схемы с общим эмиттером — $\beta$ (бэта) или $h'_{21}$.

В паспортах полупроводниковых триодов обычно указывают значение $\alpha$. Однако значения $\alpha$ и $\beta$ жестко связаны между собой простой зависимостью:

$$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}, \text{ или } \alpha = \frac{\beta}{\beta+1},$$

так что при необходимости всегда можно перейти от одного параметра к другому. Для облегчения этого перехода на рис. 23 приведена номограмма.

Имея в распоряжении несколько триодов разных марок и испытывая их поочередно в схеме усилителя (при этом для каждого триода может потребоваться индивидуальный подбор сопротивления $R_2$), нетрудно убедиться, что триоды с большими значениями $\beta$ (П1Г, П6Г) дают заметно бо́льшую громкость приема, чем триоды с малым $\beta$ (П1А, П6А).

На рис. 24 представлен вариант конструкции усилителя с одним триодом, смонтированного в виде переходной вилки. Питание этого усилителя осуществляется от одного элемента типа ФБС, запаса энергии которого хватает более чем на 500 *ч* работы усилителя. Сопротивление $R_2$ подбирается в этой схеме так, чтобы ток коллектора составлял 0,4—0,5 *ма*. Ток коллектора можно контролировать непосредственно милиамперметром, включаемым последовательно с телефонами, или путем измерения высокоомным вольтметром (10—20 *ком*) падения напряжения на телефонах с известным сопротивлением постоянному току.

При использовании телефонов с сопротивлением более 2 000 *ом* или включении нескольких пар телефонов последовательно надо или уменьшить ток коллектора, или увеличивать напряжение питания.

Усилитель в виде представленной на рис. 24 конструкции включается в гнезда телефонов детекторного приемника, а в гнезда, расположенные сверху, включаются телефоны. Для выключения питания достаточно вынуть элемент из пружин, укрепленных сбоку корпуса.

**Усилитель для громкоговорящего приема.** Уверенный громкоговорящий прием на детекторный приемник можно получить с двухкаскадными усилителями.

Простейший двухкаскадный усилитель (рис. 25) собирается на двух полупроводниковых триодах, каждый из которых работает в схеме с общим эмиттером.

От первого каскада требуется максимальное усиление. Для этого в качестве $ПТ_1$ целесообразно применить триод с возможно бо́льшим $\beta$ (например, П1Г или П6Г), а также выбрать рабочую точку при токе коллектора порядка 1 *ма* (подбором сопротивления $R_1$).

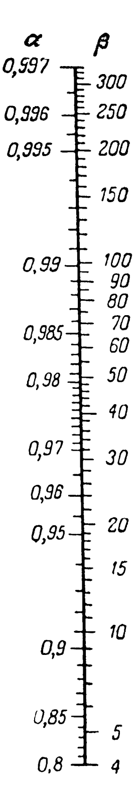



Рис. 23. Номограмма для пересчета коэффициентов усиления по току в схеме с общей базой ($\alpha$) и общим эмиттером ($\beta$).

В качестве второго триода $ПТ_2$ также выгодно применить прибор с большим значением $\beta$. Однако основной задачей оконечного каскада является не максимальное усиление, а обеспечение значительной выходной мощности. При этом к выбору режима второго триода надо подходить иначе.

Дело в том, что максимальная отдаваемая мощность в классе А ограничена полупроизведением напряжения коллектора на ток коллектора в выбранной рабочей точке:

$$P_{вых} \leqslant 0{,}5 U_к I_к .$$

Поэтому, желая, например, получить выходную мощность $P_{вых} = 20$ *мвт* при напряжении коллектора $U_к = 9$ *в*, надо выбрать ток коллектора не менее

$$I_к = \frac{P_{вых}}{0{,}5U_к} = \frac{20}{0{,}5 \cdot 9} \approx 4{,}5 \text{ ма}.$$

Учитывая потери в выходном трансформаторе, следует принять $I_к = 5$ *ма*. Увеличение тока коллектора повышает предельную мощность, которую сможет отдавать триод, но одновременно потребует еще в большей мере увеличить предварительное усиление сигнала, так как коэффициент усиления оконечного каскада с увеличением тока понизится.

Усилитель по схеме на рис. 25 рассчитан на максимальную выходную мощность 20 *мвт*, чего вполне достаточно для прослушивания радиопередач на электродинамический громкоговоритель в комнате.

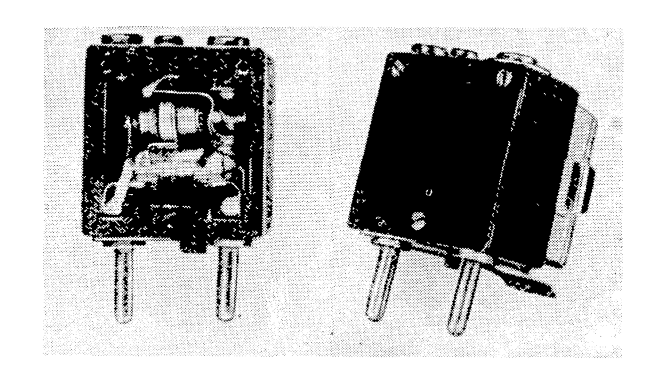


Рис. 24 Усилитель-приставка, выполненный по схеме рис. 22

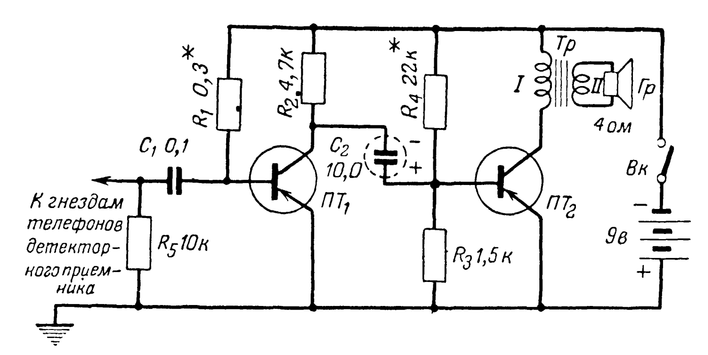



Рис. 25. Принципиальная схема усилителя с двумя триодами (звездочками помечены сопротивления, требующие индивидуального подбора).

Для того чтобы полупроводниковый триод «отдал» максимальную мощность, надо еще правильно выбрать сопротивление нагрузки.

Приведенное к первичной обмотке сопротивление должно составлять:

$$R'_н = \frac{U_к}{I_к}.$$

В нашем случае

$$R'_н = \frac{9}{5} = 1{,}8 \textit{ ком}.$$

В качестве громкоговорителя удобно применить малогабаритный трансляционный электродинамический громкоговоритель типа „Малютка". Сопротивление звуковой катушки его на постоянном токе составляет 4 *ом*. Принимая сопротивление переменному току $Z_{гр}$ в среднем на 20% выше (5 *ом*) и считая к. п. д. выходного трансформатора $\eta_{тр} = 0{,}9$, можно определить необходимый коэффициент трансформации:

$$n = \sqrt{\frac{R'_н \eta_{тр}}{Z_{гр}}} = \sqrt{\frac{1\,800 \cdot 0{,}9}{5}} = 18 : 1.$$

В описываемом усилителе был применен выходной трансформатор с сердечником из стали с высокой проницаемостью (пластины типа Ш-9 при толщине пакета 10 *мм* и зазоре около 0,1 *мм*). Обмотка *I* имеет 1 680 витков провода ПЭЛ 0,15, а обмотка *II* — 93 витка ПЭЛ 0,31.

Для обеспечения необходимого смещения в оконечном каскаде применена улучшенная схема с двумя сопротивлениями ($R_3$ и $R_4$). Уточняя сопротивление $R_4$, можно подобрать строго необходимый ток коллектора (5 *ма*). Такая схема менее чувствительна к смене триодов, чем схема с одним сопротивлением.

В качестве емкости $C_2$ использован малогабаритный электролитический конденсатор типа ЭМ на рабочее напряжение 10 *в*. Все сопротивления усилителя взяты типа УЛМ 0,12. Оба триода были применены типа П1Г. Возможна замена триодов любым другим типом из числа П1 или П6. Емкость конденсатора $C_2$ может быть уменьшена до 0,5—1 *мкф*.

При питании усилителя от двух батареек типа КБС-Л-0,5 их энергии хватит на 80—100 *ч* работы усилителя.

## РАДИОГРАММОФОН

На рис. 26 представлена принципиальная схема усилителя для обычного электромагнитного звукоснимателя. Этот усилитель обеспечивает максимальную выходную мощность порядка 70 *мвт* и может получать питание от батарейки

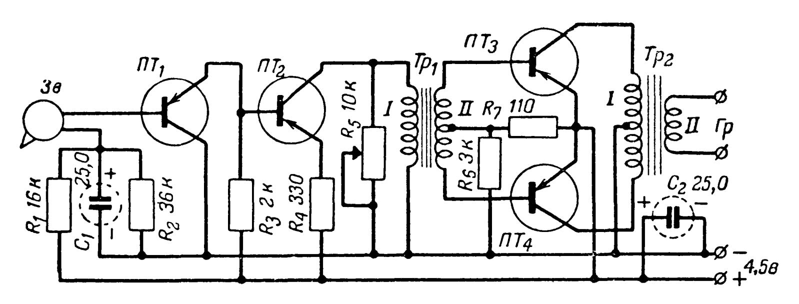



Рис. 26. Принципиальная схема усилителя для воспроизведения грамзаписи.

карманного фонаря. Схема усилителя настолько проста, что его можно вмонтировать в тонарм самого звукоснимателя (рис. 27 и 28), причем к такому звукоснимателю остается присоединить громкоговоритель и карманный фонарик.

В схеме этого усилителя мы впервые встречаемся с рядом новых элементов полупроводниковых схем: двухтактным оконечным каскадом, каскадом с общим коллектором, мерами по стабилизации рабочей точки. Рассмотрим их по очереди.

**Двухтактный каскад.** Двухтактный каскад в классе В позволяет заметно повысить экономичность усилителя. В принципе работа полупроводниковых триодов в классе В аналогична работе так называемых «правых» трио-

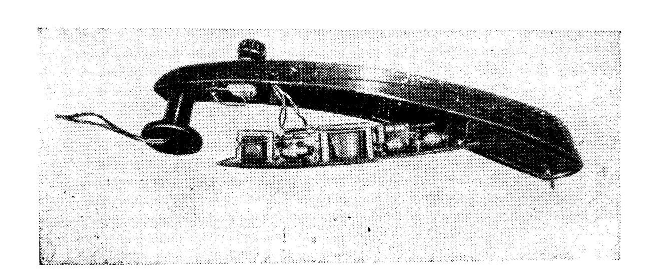


Рис. 27. Конструкция усилителя, выполненного по схеме на рис. 26.

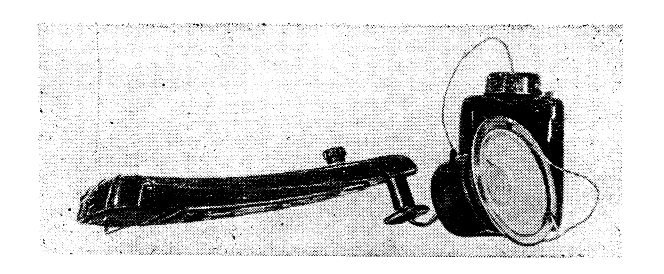


Рис. 28. Полный комплект воспроизводящего устройства с усилителем, вмонтированным в тонарм.

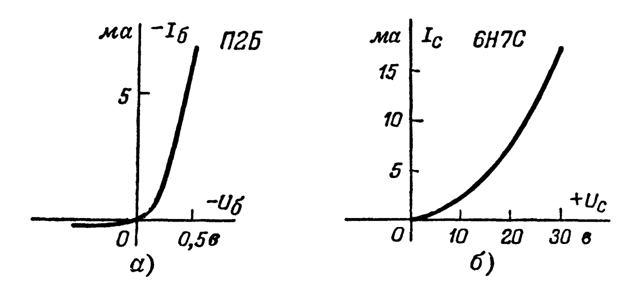



Рис. 29. Входная характеристика полупроводникового (*а*) и сеточная характеристика вакуумного (*б*) триодов.

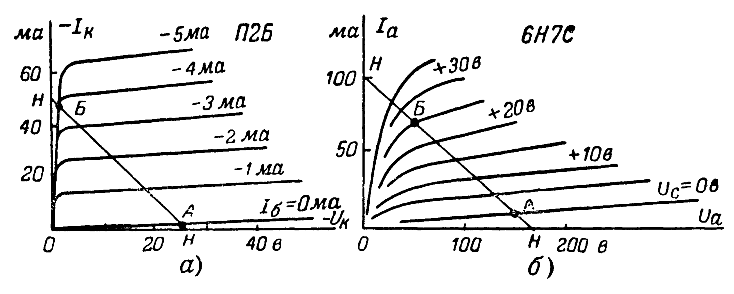



Рис. 30. Семейства выходных характеристик полупроводникового (*а*) и анодных характеристик „правого" вакуумного (*б*) триодов.

дов — ламп в этом же классе (т. е. ламп, у которых основной рабочий участок анодно-сеточных характеристик лежит в области положительных напряжений на управляющей сетке; при этом лампы работают со значительными сеточными токами).

Сравнивая статические характеристики „правого" и полупроводникового триодов (рис. 29 и 30), нетрудно заме-

тить, что качественно соответствующие характеристики обоих приборов аналогичны. Приложение и увеличение напряжения определенной полярности ко входным электродам ($U_б$ и $U_c$ на рис. 29) вызывают нелинейное нарастание тока ($I_б$ и $I_c$), напряжение обратной полярности не вызывает заметного тока во входной цепи. Токи в цепи выходных электродов ($I_к$ и $I_a$ на рис. 30) сильно зависят от тока или напряжения управляющего электрода ($I_б$ и $U_c$) и в значительно меньшей мере от напряжения самого выходного электрода ($U_к$ и $U_a$).

Однако более внимательное рассмотрение этих характеристик позволяет обнаружить и существенную разницу между лампой и полупроводниковым триодом.

Из характеристик на рис. 29 видно, например, что для получения нормальных для оконечного каскада токов базы достаточно напряжений «раскачки», в десятки раз меньших, чем у лампы. Действительно, для возбуждения усилителей с полупроводниковыми триодами независимо от выходной мощности обычно достаточно напряжений порядка нескольких десятых долей вольта вместо нескольких десятков вольт, обычных для лампы. Для большей наглядности сравнения выходных характеристик на их семействах (рис. 30) нанесены линии нагрузки *НН*, зависящие от сопротивления нагрузки и показывающие, как перемещается рабочая точка усилительного прибора в процессе усиления сигнала.

Ввиду резкой налинейности характеристик лампы в области анодных напряжений ниже 50 *в* рабочий участок линии нагрузки приходится ограничивать точками *АБ*, причем анодное напряжение лампы используется неполностью, что приводит к снижению экономичности усилителя и ограничению максимальной выходной мощности.

У полупроводникового триода характер начальных участков выходных характеристик значительно лучше, что позволяет использовать напряжение коллектора на 95% и выше (точка *Б* обычно приходится при напряжении коллектора 0,2—0,5 *в*). Бросается также в глаза лучшая в сравнении с лампой линейность характеристик, что позволяет рассчитывать на меньшие нелинейные искажения.

К сожалению, статические характеристики полупроводниковых триодов в схеме с общим эмиттером имеют существенный разброс по значениям тока базы $I_б$ у различных экземпляров, даже в пределах одного типа, и это осложняет предварительный расчет каскада.

В режиме класса В исходная рабочая точка выбирается в районе «тока отсечки»: при пересечении линии нагрузки с характеристикой $I_б = 0$ (точка *А* на рис. 30,*а*). Эта точка обычно соответствует току коллектора около 1 *ма*, причем падением напряжения в обмотке выходного трансформатора можно пренебречь и считать исходное напряжение коллектора $U_к$ равным напряжению источника питания.

Сопротивление нагрузки, приведенное к одному плечу, определяется по значению желаемой выходной мощности $P_{вых}$ каскада·

$$R'_{н1} = \frac{U_к^2}{2,2P_{вых}}$$

(все величины в основных единицах — *в*, *вт*, *ом*).

Расчет мощности, которую надо подвести к триодам оконечного каскада требует знания индивидуальных характеристик этих триодов и учета схемных особенностей построения входной цепи оконечного каскада. Следует помнить, что чем выше значение β используемых в оконечном каскаде триодов, тем большее усиление они дают и соответственно тем меньшая мощность требуется для их «раскачки». При употреблении триодов с β = 50 достижим коэффициент усиления по мощности каскада в классе В порядка 1 000, при β = 15 он снижается до 100.

В двухтактном каскаде надо стараться применять триоды в обоих плечах с одинаковыми β. Поскольку разброс промышленных триодов по значениям β велик, очень полезно уметь измерять значение β. О том, как это делается, мы сообщаем в конце брошюры.

**Усилитель с общим коллектором.** При желании использовать стандартный высокоомный звукосниматель, надо обеспечить достаточно высокое входное сопротивление усилителя (несколько десятков килоом). Для этого может быть применена схема с общим коллектором или, как ее называют по аналогии с катодным повторителем, схема «эмиттерного повторителя».

Схема первого каскада нашего усилителя (рис. 26) отличается от упрощенной схемы эмиттерного повторителя (рис. 20) лишь наличием цепей питания ($R_1$, $R_2$, $C_1$).

Подобно катодному повторителю эмиттерный повторитель не дает усиления по напряжению. Однако он обладает высоким входным (десятки и сотни килоом) и очень малым

(десятки и сотни ом) выходным сопротивлениями. Следовательно, применяя высокоомный генератор и низкоомное сопротивление нагрузки, можно получить усиление тока.

Таким образом, эмиттерный повторитель осуществляет не только функции согласования с высокоомным источником сигнала, но и усиление мощности сигнала.

В каскаде с общим коллектором тоже выгодно применять триоды с высоким значением β, ибо все основные характеристики каскада при этом улучшаются.

**Стабилизация рабочей точки.** В связи с существенным различием статических характеристик отдельных образцов триодов одного и того же типа, а также с сильной температурной зависимостью их к настоящему времени разработано много способов стабилизации рабочей точки.

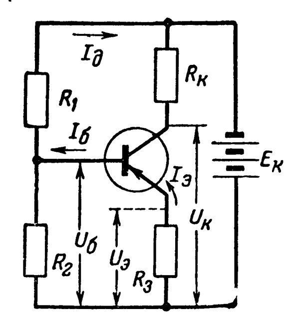


Рис. 31. Основная схема стабилизации рабочей точки полупроводникового триода.

Наиболее употребительная схема стабилизации показана на рис. 31, на котором ради упрощения показаны только цепи, обеспечивающие питание полупроводникового триода. Идея стабилизации основывается, во-первых, на применении отрицательной обратной связи по постоянному току и, во-вторых, на том обстоятельстве, что напряжение между эмиттером и базой при любых нормальных значениях тока пренебрежимо мало́ (порядка 0,2—0,3 *в*, см. рис. 29,*а*).

С помощью делителя из сопротивлений $R_1$ и $R_2$, берущего ток $I_д$, значительно больший, чем ток нагрузки делителя (ток базы $I_б$), базе триода придают достаточно жесткий потенциал, мало зависящий от свойств полупроводникового триода:

$$U_б \approx E_к \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

Далее, пренебрегая малым падением напряжения между электродами база—эмиттер, можно считать, что потенциал эмиттера такой же, т. е.

$$U_э \approx U_б.$$

Но, с другой стороны,

$$U_э = I_э R_3,$$

где $I_э$ — постоянный ток в цепи эмиттера.

Величины $U_э$ и $R_3$ заданы, значит обеспечено и определенное значение тока эмиттера:

$$I_э \approx \frac{E_к R_2}{R_3 (R_1 + R_2)},$$

которое, как видно из полученной формулы, не зависит от свойств триода и определяется только схемными элементами.

Так как ток коллектора весьма близок по своему значению к току эмиттера, значит обеспечен и стабильный потенциал коллектора:

$$U_к \approx E_к - I_э R_к,$$

где $R_к$ — суммарное сопротивление постоянному току, включенное в цепь коллектора. При этом напряжение коллектора относительно эмиттера

$$U_{к\text{-}э} = U_к - U_э \approx E_к \left[1 - \frac{R_2 R_к}{R_3 (R_1 + R_2)}\right],$$

которое определяет рабочую точку триода, также оказывается не зависящим от свойств полупроводникового триода.

Стабилизация получается тем лучшей, чем больше отношение тока делителя $R_1$ и $R_2$ к току базы и чем большее значение $U_б$ выбрано. Вполне удовлетворительная стабилизация в каскадах предварительного усиления получается при выборе тока делителя порядка 0,2—0,5 *ма* и $U_б = -1$ *в*.

В реальных схемах усилителей для предотвращения обратной связи по рабочим частотам и снижения усиления часто некоторые из стабилизирующих сопротивлений блокируют конденсаторами достаточной емкости. Особенно большая емкость (несколько десятков микрофарад) требуется для блокирования сопротивления $R_3$ в низкочастотных усилителях, ибо, как это уже указывалось при рассмотрении схемы с общим коллектором, выходное сопротивление триода по цепи эмиттера может иметь чрезвычайно малые значения (десятки ом).

Именно по схеме рис. 31 осуществлена стабилизация рабочей точки первого каскада усилителя (рис. 27). Нетрудно посчитать, что здесь выбраны $U_б$ около 1,4 *в* и соответственно $I_э$ около 0,7 *ма*. В действительности из-за нагрузки делителя $R_1R_2$ током базы и падения напряжения между базой и эмиттером получается: $U_б \approx -1,1$ *в* и $I_э \approx$ $\approx 0,5$ *ма*.

Стабилизация рабочей точки второго каскада осуществляется на том же принципе, но вместо нового делителя применено непосредственное соединение базы второго триода с эмиттером первого, причем ей сообщается уже стабилизированный потенциал. Ток эмиттера второго триода получается примерно равным 2,5 *ма*.

Сопротивление $R_4$ не блокируется с целью сохранения обратной связи и по усиливаемому сигналу, что способствует стабилизации коэффициента усиления второго каскада, некоторому повышению его входного сопротивления (что улучшает режим предшествующего каскада) и снижению искажений. Для улучшения тембра звука и снижения шума иглы можно ко вторичной обмотке трансформатора $Тр_1$ присоединить конденсатор емкостью 0,02—0,1 *мкф*.

В оконечном каскаде применена упрощенная схема задания рабочей точки, так как при ограниченном напряжении источника питания (4,5 *в*) схемы стабилизации приведут здесь к ощутимому снижению неискаженной выходной мощности и ухудшению экономичности усилителя.

В описываемом усилителе применены постоянные сопротивления типа УЛМ-0,12, переменное ($R_5$) типа СПО-0,5, конденсаторы типа ЭМ на рабочее напряжение 4 *в* ($C_1$) и 6 *в* ($C_2$).

Все полупроводниковые триоды взяты типа П1Г с $\beta=40\div60$ ($ПТ_3$ и $ПТ_1$ подобраны с примерно одинаковыми $\beta$, различающимися не более чем на 20%).

Оба трансформатора выполнены на сердечниках из 45% пермаллоя. Сердечник трансформатора $Тр_1$ собран из пластин типа Ш-4 при толщине 5 *мм* с зазором около 0,05 *мм*, а сердечник трансформатора $Тр_2$ — из пластин типа Ш-6 при толщине пакета 8 *мм* без зазора. Обмотка *I* трансформатора $Тр_1$ состоит из 1 600 и обмотка *II* — из 2×340 витков провода ПЭЛ 0,1. Обмотка *I* трансформатора $Тр_2$ состоит из 2×250 витков провода ПЭЛ 0,25 и обмотка *II* — из 60 витков ПЭЛ 0,37 (под сопротивление громкоговорителя 4 *ом*). Половины двухтактных обмоток обоих трансформаторов

наматываются одновременно двумя проводами, а затем соединяются последовательно (начало одного провода — с концом второго). Точка соединения их образует среднюю точку обмотки. При этом удается получить очень хорошую симметрию двухтактных обмоток и одинаковое сопротивление их постоянному току, что очень важно для схемы, работающей при малом напряжении источника питания.

В режиме покоя усилитель потребляет ток около 7 *ма*. При пиках мощности импульсы тока достигают 30 *ма*. Среднее потребление при прослушивании грамзаписи не превышает 15 *ма*. Таким образом, запаса энергии одной батарейки типа КБС-Л-0,5 хватает на 30—40 *ч* работы усилителя.

Конечно, для прослушивания грамзаписи в домашних условиях при наличии электрической сети описанный усилитель не представляет особого интереса, так как экономичность при этом отступает на задний план, а первым требованием становится высокое качество воспроизведения, которое он не может обеспечить хотя бы в силу недостаточной для хорошего воспроизведения всей полосы частот выходной мощности. Тем не менее даже этот весьма простой усилитель, на примере описания которого нам удалось познакомиться с некоторыми специфическими вопросами применения полупроводниковых триодов, в состоянии успешно конкурировать по качеству и громкости воспроизведения с мембранными патефонами, причем размеры проигрывателя за счет замены рупора малогабаритным динамиком и снижения мощности пружинного двигателя могут быть уменьшены, а долговечность грампластинок — увеличена, так как приведенный к концу иглы звукоснимателя вес в несколько раз меньше, чем у мембраны.

## МАЛОГАБАРИТНЫЕ ПРИЕМНИКИ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТРИОДАХ

**Простейший приемник с фиксированной настройкой на местную радиостанцию.** Приемник, обеспечивающий прием местной радиостанции на телефоны, состоит из контура с ферритовой антенной, диодного детектора и усилителя низкой частоты на двух полупроводниковых триодах. Принципиальная схема его приведена на рис. 32.

Чтобы реализовать возможность изготовления приемника на полупроводниковых триодах в виде миниатюрной конструкции, прибегают к использованию ферритовой антен-

ны. Последняя представляет собой стержень из особой керамики, обладающей высокой магнитной проницаемостью ($\mu = 100 \div 700$), причем катушка входного колебательного контура наматывается непосредственно на этом стержне. Такая катушка с точки зрения антенных свойств равноценна рамочной антенне с тем же числом витков, но с сечением примерно в $\mu$ раз бо́льшим. Таким образом, применение ферритового стержня позволяет резко сократить размеры антенны. Однако действующая высота ферритовой антенны,

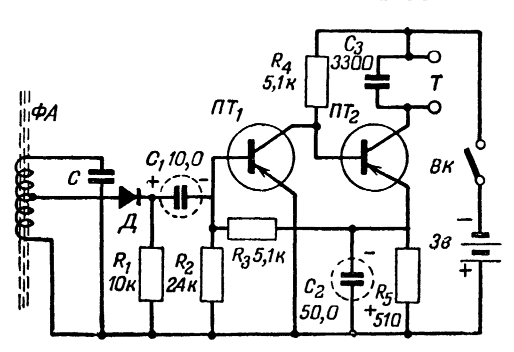



Рис. 32. Принципиальная схема простейшего приемника на двух полупроводниковых триодах.

как и рамочной, чрезвычайно мала. У современных ферритовых антенн в диапазоне средних и длинных волн она составляет лишь около 1 *см*. Поэтому сигнал, создаваемый в контуре ферритовой антенны, очень мал, и если этот сигнал подавать на детектор без предварительного усиления по высокой частоте, то оказывается возможным прием только достаточно мощных местных радиостанций.

Для того чтобы воспринятая антенной мощность по возможности без потерь была передана к детектору, надо, во-первых, обеспечить наибольшую добротность катушки колебательного контура (для этого катушку следует наматывать литцендратом) и, во-вторых согласовать собственное активное сопротивление колебательного контура с сопротивлением, вносимым в колебательный контур со стороны детектора. Для этого прибегают к автотрансформаторной связи детектора с контуром путем использования отвода от катушки.

Двухкаскадный усилитель, следующий за диодным детектором, выполнен по схеме включения полупроводнико-

вых триодов с общим эмиттером. Выбранный способ подачи питания обеспечивает сильную обратную связь по постоянному току, причем рабочие точки обоих триодов устанавливаются автоматически и отличаются хорошей стабильностью как при смене триодов, так и при изменениях температуры. Описываемая схема не критична к параметрам примененных полупроводниковых триодов, в качестве которых могут быть взяты триоды любой группы: П1, П6 или П5.

Число витков катушки ферритовой антенны *ФА* зависит от примененного стержня. Для приема станции, работающей в диапазоне средних волн, катушка должна содержать 30—50, а для станции длинноволнового диапазона 100—150 витков литцендрата из 5—11 жилок диаметром 0,05—0,07 *мм* каждая. Катушку наматывают виток к витку в один ряд посредине стержня. Отвод для подключения детектора делается от $^1/_3$—$^1/_5$-й части полного числа витков. Концы катушки закрепляются ниткой. При креплении стержня металлическими деталями не надо применять элементы, создающие короткозамкнутые витки, охватывающие стержень. В местах крепления стержня для предотвращения излишних механических напряжений обычно надевают на стержень отрезки резиновой трубки.

В качестве диода *Д* можно применить любой точечный германиевый диод: ДГ-Ц1-ДГ-Ц14 или Д2А-Д2Ж.

Налаживание приемника обычно сводится к подбору емкости конденсатора *С* для настройки колебательного контура на частоту выбранной радиостанции.

Если настройка на станцию путем подбора емкости *С* в пределах 100—600 *пф* не удается, то надо изменить исходное число витков катушки вдвое.

Настройку удобно производить с помощью генератора стандартных сигналов (например, ГСС-6), причем на выходе генератора включается короткозамыкающий провод, которому придается форма одиночного витка диаметром 10—20 *см*. Приемник с ферритовой антенной располагается на расстоянии 10—20 *см* от этого витка так, чтобы ось стержня антенны была перпендикулярна плоскости витка.

Ферритовая антенна, как и рамочная, обладает направленностью, поэтому для достижения наибольшей громкости приема радиостанции надо подбирать соответствующее положение приемника.

Возможный вариант конструкции описываемого приемника с укороченной ферритовой антенной показан на рис. 33.

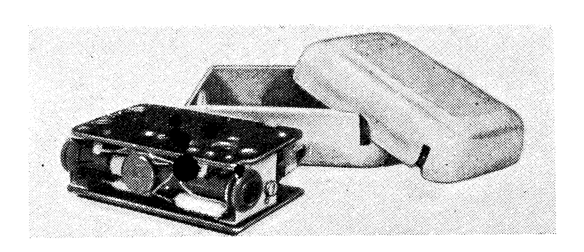


Рис. 33. Конструкция приемника, выполненного по схеме на рис. 32.

**Супергетеродинный приемник.** Для приема более удаленных и менее мощных радиостанций на приемник с ферритовой антенной надо высокочастотный сигнал усиливать до подачи на детектор.

Как и в ламповых приемниках, возможно применение схемы прямого усиления на частоте принимаемой станции или схемы супергетеродинного приема с преобразованием несущей частоты в постоянную для данного приемника промежуточную частоту.

Для приемников на полупроводниковых триодах супергетеродинная схема в сравнении со схемой прямого усиления обладает еще бо́льшими преимуществами, чем в случае ламповых приемников, ибо полупроводниковые триоды обычно дают меньшее усиление на каскад, чем лампы, и значит, требуется большее число настраиваемых контуров при одинаковой чувствительности. К тому же усиление полупроводниковых триодов в области высоких частот сильно изменяется с изменением рабочей частоты, что приводит к большой неравномерности чувствительности приемников прямого усиления в пределах диапазона. Кроме того, полупроводниковым триодам присуща заметная внутренняя обратная связь, которую стараются нейтрализовать в усилителях высокой частоты особыми схемными элементами. Эта нейтрализация обратной связи осуществляется легче в усилителях, работающих на фиксированной частоте.

В рамках настоящей брошюры нет возможности детально рассмотреть эти вопросы и показать, как они решаются в современных полупроводниковых приемниках, равноценных хорошим ламповым. Мы ограничимся описанием простого супергетеродина, пригодного для громковогорящего приема местных станций, работающих в трех каналах. При хорошем налаживании этот приемник способен обеспечить

громкоговорящий прием радиовещательных станций, удаленных более чем на 100 *км*.

Принципиальная схема приемника приведена на рис. 34. Источником питания приемника служит батарея на 4,5 *в*, составленная из трех сухих элементов типа ФБС. Благодаря применению общего делителя напряжения (из сопротивлений $R_6$ и $R_7$, блокированных конденсаторами $C_{14}$ и $C_{15}$) в схеме приемника удалось изъять индивидуальные делители напряжения для цепей баз и обеспечить хорошую стабильность рабочих точек всех триодов. По сути дела питание всех триодов осуществляется при этом по схеме с общей базой с двумя источниками напряжения (+0,9 *в* для цепей эмиттеров и —3,6 *в* для цепей коллекторов).

Выходной каскад приемника с триодом $ПТ_4$ является усилителем низкой частоты класса А. В качестве громкоговорителя применена микротелефонная электромагнитная система типа ДЭМ с катушкой, обладающей сопротивлением постоянному току около 70 *ом*.

Предшествующий каскад на триоде $ПТ_3$ является детектором. Рабочая точка триода выбрана так, что при напряжении высокочастотного сигнала порядка 10—20 *мв* триод выходит из линейного режима, причем в цепи коллектора появляется составляющая, пропорциональная амплитуде высокочастотного сигнала. Таким образом, примененный детектор на полупроводниковом триоде работает аналогично известному анодному детектору на трехэлектродной лампе. Благоприятный для детектирования режим (ток эмиттера около 0,5 *ма*) обеспечен соответствующим выбором сопротивления $R_3$.

Для повышения усиления низкочастотного сигнала связь с оконечным каскадом осуществлена при помощи автотрансформатора *Тр*.

Триод $ПТ_2$ работает в каскаде усиления промежуточной частоты. В описываемом приемнике выбрана довольно низкая промежуточная частота (130 *кгц*), благодаря чему удается получить относительно большое усиление каскада и хорошую избирательность с одиночными контурами. Повышению усиления и избирательности каскада промежуточной частоты содействует и применение трансформаторных связей обоих контуров с цепями баз.

Преобразователь частоты с полупроводниковым триодом $ПТ_1$ собран по «автодинной» схеме, отличающейся тем, что функции смесителя и гетеродина выполняет один триод.

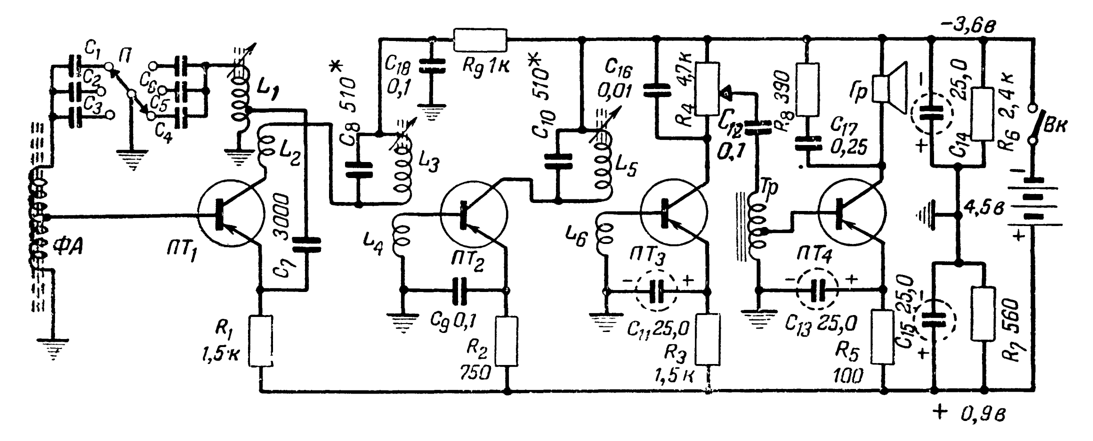


Рис. 34. Принципиальная схема простого супергетеродина на четырех полупроводниковых триодах.

Гетеродинный контур с катушкой $L_1$ введен в цепь эмиттера, а катушка обратной связи $L_2$ — в цепь коллектора. Таким образом, в схеме гетеродина триод работает с общей базой. Как и в ламповых генераторах, здесь небезразлична фаза обратной связи, которая зависит от включения концов катушек $L_1$ и $L_2$. Если гетеродин не генерирует, то меняют местами концы катушки $L_2$. Признаком генерации является небольшое изменение постоянного напряжения на сопротивлении $R_1$ при замыкании катушки $L_1$.

Сигнал принимаемой станции подается с отвода катушки ферритовой антенны *ФА* на базу триода $ПТ_1$. Для выделения колебаний промежуточной частоты в цепь коллектора последовательно с катушкой обратной связи гетеродина введен колебательный контур $L_3C_8$, настроенный на частоту 130 *кгц*.

Для уменьшения габаритов приемника и упрощения налаживания его вместо сдвоенного блока конденсаторов переменной емкости применен сдвоенный переключатель *П*, служащий для переключения контуров ферритовой антенны и гетеродина на прием одной из трех станций, предусмотренных первичной настройкой приемника.

Диапазон волн, в пределах которого возможен первоначальный выбор принимаемых станций, лежит в пределах 200—1 800 *м*. Этому диапазону соответствуют емкости контура ферритовой антенны ($C_1$ — $C_3$) в пределах 10—1 500 и гетеродинного контура ($C_4$ — $C_6$) 10—1 000 *пф*. Однако устойчивая работа гетеродина в столь широком диапазоне частот за счет изменения только емкости конденсатора гетеродинного контура возможна лишь при применении в качестве преобразователя достаточно высокочастотного полупроводникового триода. В противном случае надо ограничиваться выбором трех настроек, более близких по частоте (например, в пределах только средних волн), или вводить переключение катушек.

Полезно также достаточно высокочастотный триод применить и в каскаде усиления промежуточной частоты, так как при этом усиление каскада возрастает.

Дело в том, что неосновные носители, инъектированные эмиттером в базу (дырки в триодах типа *p-n-p*), движутся в области базы благодаря диффузии довольно медленно. И, несмотря на то, что ширина базовой области очень мала, они затрачивают заметное время на преодоление пути от эмиттера к коллектору. Время диффузии дырок через базу у полупроводниковых триодов имеет порядок 1 *мксек*, что

в сотни раз превышает, например, время пролета электронов в вакуумных радиолампах. Эта разница в скоростях носителей в лампе и полупроводниковом триоде вызвана тем, что в лампе электроны летят под действием ускоряющего поля потенциала анода, а в полупроводниковом триоде в области базы дырки движутся лишь благодаря диффузии.

В масштабах радиотехники высоких частот время 1 *мксек* — весьма заметный интервал (это, например, период колебания с частотой 1 *Мгц*, соответствующего длине волны 300 *м*). Инерционность процессов внутри усилительных приборов приводит к тому, что по мере повышения частоты усиливаемого сигнала усиление начинает уменьшаться и, наконец, на некоторой предельной для данного прибора частоте пропадает совсем.

Поэтому, применяя полупроводниковые триоды в высокочастотных схемах, надо интересоваться предельными частотами, на которых могут работать эти триоды.

Распространенным высокочастотным параметром полупроводникового триода является так называемая «граничная частота коэффициента усиления по току в схеме с общей базой» $f_\alpha$. Это та частота, на которой коэффициент усиления по току в схеме с общей базой ($\alpha$) уменьшается до 0,7 своего низкочастотного значения ($\alpha_0$).

Так как $\alpha_0$ плоскостных триодов весьма близок к единице, часто через $f_\alpha$ обозначают частоту, на которой $\alpha$ просто равняется 0,7, а не $0{,}7\alpha_0$. Именно при таком способе определения триоды типов П1А, П1Б, П1В, П1Г и П1Д имеют $f_\alpha$ не менее 100 *кгц*, типов П1Е, П6Б, П6В и П6Д — не менее 465—500 *кгц*, типов П1Ж и П6Г — не менее 1 *Мгц* и типа П1И — не менее 1,6 *Мгц*.

Однако на практике нас интересует, как правило, усиление не по току, а по мощности. При этом знать только $f_\alpha$ недостаточно, хотя очень часто «предельная частота генерации» ($f_{макс}$), представляющая собой ту частоту, на которой прекращается усиление мощности сигнала, имеет тот же порядок, что и $f_\alpha$.

Для триодов типов П1 и П6 обычно $f_{макс}$ вдвое-втрое превышает $f_\alpha$. Связь этих параметров неоднозначная и в сильной мере определяется внутренней обратной связью, присущей данному триоду. Во всяком случае надо иметь в виду, что на высоких частотах полупроводниковый триод

обеспечивает тем большее стабильное усиление мощности сигнала, чем выше его $f_{макс}$, а значение $f_{макс}$ в общем случае выше для того триода, у которого больше $f_{\alpha}$.

Стабильное усиление предполагает употребление схем, нейтрализующих внутреннюю обратную связь. Отсутствие нейтрализации может приводит как к снижению реального усиления каскада, так и к повышению его вплоть до самовозбуждения усилителя.

В описываемом приемнике в усилителе промежуточной частоты не применена нейтрализация, потому что при выбранной промежуточной частоте и употреблении в качестве триода $ПТ_2$ приборов типа П6, как правило, никаких неприятностей не происходит. В неблагоприятном случае или ради эксперимента можно испытать простейший способ нейтрализации. Он состоит в том, что между базами триодов $ПТ_2$ и $ПТ_3$ включается конденсатор, емкость которого подбирается экспериментально в пределах 50—200 *пф*. При этом может потребоваться переключение концов катушки $L_6$.

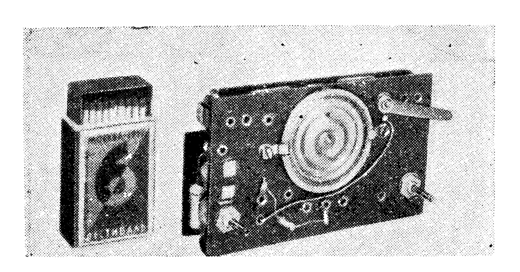


Рис. 35. Конструкция приемника, выполненного по схеме на рис. 34.

В приемнике используются малогабаритные детали (сопротивления типа УЛМ и конденсаторы типов КДМ, КТМ, МБМ и ЭМ). Автотрансформатор низкой частоты *Тр* выполнен на пермаллоевом сердечнике из пластин типа Ш-4 при толщине пакета 6 *мм* и имеет 2 000 витков провода ПЭЛ 0,08 с отводом от 400-го витка. Катушки $L_1$ (140 витков с отводом от 26-го витка) и $L_2$ (43 витка), $L_3$ (300 витков) и $L_4$ (60 витков), а также $L_5$ (300 витков) и $L_6$ (60 витков) намотаны проводом ПЭЛ 0,1 и помещены в броневые карбонильные сердечники типа СБ-1а.

В качестве антенны *ФА* применен ферритовый стержень диаметром 8 и длиной 115 *мм* с эффективной магнитной

проницаемостью около 100. Катушка антенны состоит из 60 витков литцендрата ЛЭШД 5×0,07 с отводом от 9-го витка.

Налаживание приемника сводится к настройке контуров $L_3C_8$ и $L_5C_{10}$ на частоту 130 *кгц*, подбору конденсаторов $C_1$ — $C_3$, обеспечивающих резонанс антенны на частотах трех выбранных станций, и конденсаторов $C_4$ — $C_6$, настраивающих гетеродин на частоты, отличающиеся от принимаемых на 130 *кгц*.

Возможный вариант конструкции этого приемника показан на рис. 35.

## ПРОСТЕЙШИЕ ИСПЫТАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТРИОДОВ

**Измерение обратного тока коллектора** $I_{к.о}$ производится по схеме рис. 17 (стр. 19). Для измерения значения $I_{к.о}$ необходим чувствительный измерительный прибор (микроамперметр) со шкалой не более чем на 100 — 200 *мка*.

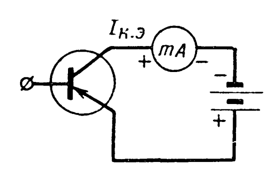


Рис. 36. Схема измерения начального тока коллектора при включении триода по схеме с общим эмиттером.

У маломощных триодов, на которых собираются все описанные в этой брошюре схемы, значения $I_{к.о}$ при напряжениях в несколько вольт и нормальной комнатной температуре (20° С) не должны превышать 10 — 30 *мка*. Хорошие экземпляры полупроводниковых триодов, обеспечивающие стабильную работу в широком интервале температур, обладают обратным током коллектора $I_{к.о}$ до 1 — 2 *мка*. Бо̀льшие значения $I_{к.о}$ (более 20—30 *мка*) свидетельствуют о недоброкачественности триода и не позволяют надеяться на надежную работу его в течение длительного времени.

**Измерение начального тока коллектора в схеме с общим эмиттерсм** ($I_{к.э}$) может иметъ целью отбор приборов для схем, где не предусмотрено хороших мер стабилизации рабочей точки. Ток $I_{к.э}$ измеряется аналогично току $I_{к\,о}$, только положительный полюс батареи подключается не к базе, а к эмиттеру (рис. 36).

Значение $I_{к.э}$ для любого триода не меньше, чем $I_{к.о}$, и даже при малой величине $I_{к\,о}$ может достигать десятых

долей миллиампера. Поэтому, начиная измерение, надо прежде всего включить более грубый миллиамперметр на 1—5 *ма*. Если $I_{к.э}$ превышает 1—2 *ма*, то такой триод практически трудно использовать в большинстве схем. При токах $I_{к.э}$ 0,2—1 *ма* триоды устойчиво работают только в схемах с хорошей стабилизацией рабочей точки. Для наиболее ответственных каскадов и схем без стабилизации рабочей точки надо подбирать триоды с наименьшими значениями $I_{к.э}$ (десятки микроампер).

**Определение коэффициента усиления по току** лучше всего проводить в схеме с общим эмиттером, т. е. измерять величину β. Это можно осуществить по схеме рис. 37, позволяющей измерять ее путем непосредственного отсчета по шкале миллиамперметра в пределах $\beta = 10 \div 100$ с точностью не хуже 20%. Испытанию по этой схеме могут подвергаться триоды, у которых при напряжении на коллекторе — 4,5 *в* начальный ток ($I_{к.э}$) не превышает 1 *ма*.

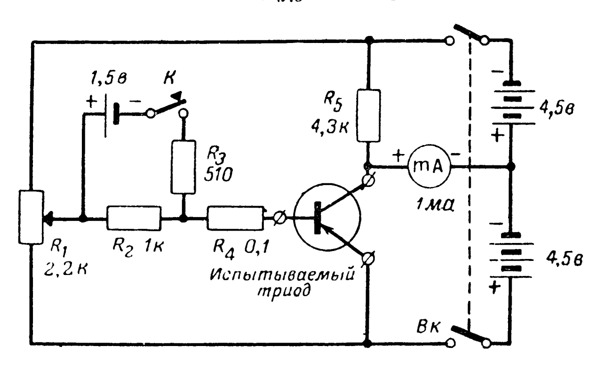



Рис. 37. Принципиальная схема прибора для измерения коэффициента усиления по току β полупроводникового триода.

В качестве источников питания схемы применяются две батарейки карманного фонаря типа КБС (на 4,5 *в*) и один элемент типа ФБС (1,5 *в*). Сопротивления $R_2$ — $R_5$ должны быть взяты с точностью не хуже 5%, миллиамперметр — со шкалой на 1 *ма*. Потенциометр $R_1$ желательно иметь с нелинейной зависимостью. Для включения испытываемого триода можно применить три зажима типа «крокодил».

В исходном состоянии выключатель питания *Вк* и кнопка измерения *К* должны быть разомкнуты. После присоединения полупроводникового триода включается питание

и при помощи потенциометра $R_1$ стрелка миллиамперметра устанавливается на нуль. При этом происходит установка рабочей точки триода, которая в данном приборе выбрана при напряжении коллектора — 4,5 *в* и токе эмиттера около 1 *ма*.

Затем нажимается кнопка *K*, причем ток базы увеличивается на 10 *мка*. Если миллиамперметр имеет достаточно малое сопротивление рамки (до 200 *ом*), то практически все приращение тока коллектора вызовет соответствующее отклонение стрелки миллиамперметра. Это отклонение прямо пропорционально значению β испытываемого триода и может быть непосредственно отсчитано по шкале миллиамперметра с учетом того обстоятельства, что вся шкала соответствует $\beta=100$. Отклонение стрелки за пределы шкалы означает, что $\beta>100$.

Невозможность установки нуля после включения питания может быть связана с большим значением $I_{к.э}$ (при любых положениях потенциометра $R_1$ стрелка отклоняется правее нуля) или малыми значениями β ($<10$) испытываемого триода (стрелка остается левее нуля).

Измерение величины β позволяет судить об усилительных свойствах триода, производить отбор наиболее подходящих триодов для различных каскадов и подбирать схожие пары триодов для двухтактных схем.

---

**Цена 1 р. 10 к.**